

برآورد فرسایش خندقی بر پایه معادلات REGEM و اصلاح ضرایب آن در استان اردبیل

حسین شهاب آرخازلو^{۱*}، شکراله اصغری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۸)

چکیده

خندق‌های کوچک به دلیل تراکم زیاد در واحد سطح، یکی از مهمترین عوامل تلفات خاک و آب به ویژه در اراضی کشاورزی است. در این پژوهش با انتخاب ۸۱ خندق کوچک در سه حوزه آبخیز از منطقه آرتاداغ، ملاحمد و سرچم در استان اردبیل، ابعاد خندق‌ها با فاصله یک سال تعیین و تغییر طول، عرض متوسط، عمق و حجم آن‌ها ثبت گردید. همچنین ابعاد خندق‌ها با استفاده از مدل REGEM با فاصله زمانی یک سال برآورد شد و همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده بررسی گردید. به منظور اصلاح و بهینه‌سازی مدل برای مناطق مورد مطالعه، با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، روابط مدل اصلاح شد و مجدداً برای برآورد ابعاد خندق‌ها و تغییرات آن در طول یک سال مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اصلاح مدل از پارامترهای تنش برشی بحرانی و عامل فرسایش خاک مدل REGEM برای برآورد ابعاد خندق شامل طول، عرض متوسط و عمق متوسط استفاده شد. نتایج نشان داد مدل REGEM تنها در منطقه سرچم کارایی لازم را در برآورد فرسایش خندقی داشت و میزان ضریب همبستگی برآورد آن با تغییر حجم اندازه‌گیری شده خندق‌ها برابر با ۰/۶۶ به دست آمد. در حالی که برآورد ابعاد خندق‌ها با مدل REGEM اصلاح شده، در هر سه منطقه همبستگی معنی‌دار با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. همبستگی تغییر حجم خندق‌ها بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل اصلاح شده برای آرتاداغ، ملاحمد و سرچم به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۶۷ و ۰/۷۸ تعیین گردید. بنابراین برای کاربرد مدل در مناطق دیگر نیاز به تصحیح مدل متناسب با شرایط منطقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح مدل REGEM، برآورد فرسایش، خندق‌های کوچک

شهاب آرخازلو ح.، اصغری ش.ا. ۱۳۹۹. برآورد فرسایش خندقی بر پایه معادلات REGEM و اصلاح ضرایب آن در استان اردبیل. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۱. صفحه: ۱۶۲-۱۷۳.

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی (مکاتبه کننده)

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

*پست الکترونیک: h.shahab@uma.ac.ir

مقدمه

بود با مقدار اندازه‌گیری شده آن وجود داشت ولی این همبستگی در مورد سطح مقطع خندق‌ها معنی‌دار نبود. رضایی مقدم و بهبودی (Rezaei Moghaddam & Behbodi, 2011) با بررسی کارایی مدل EGEM در استان آذربایجان شرقی، نشان دادند که بین مقدار فرسایش خاک و سطح مقطع اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط مدل همبستگی قوی و خوبی وجود دارد. همچنین آنها بین عرض اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط مدل نیز همبستگی معنی‌داری گزارش نمودند. در مجموع آن‌ها نتیجه گرفتند که می‌توان این مدل را برای برآورد فرسایش خاک در اثر خندق‌های موقت در حوزه آبخیز مورد بررسی، استفاده کرد. علت مشاهده نتایج متفاوت در کاربرد این مدل در مناطق مختلف استفاده از روابط مشخص مدل اولیه برای برآورد فرسایش خندقی در شرایط مختلف است. بنابراین به منظور کاربرد بهتر این مدل در برآورد فرسایش خندقی نیاز به اصلاح آن در شرایط مختلف محیطی می‌باشد (Tekwa et al., 2015). مدل EGEM و REGEM دو جزء عمده دارد (Woodward, 1999; Alonso et al., 2002). (۱) جزء هیدرولوژی: که از ورودی‌های شماره منحنی، سطح زهکشی خندق، طول جریان حوزه، شیب میانگین حوزه، بارش ۲۴ ساعته (با دوره بازگشت ۲ ساله و ۲۵ ساله) و توزیع زمانی بارش استفاده می‌کند تا مقدار اوج تخلیه رواناب و حجم آبدوی را برآورد کند. تخلیه اوج و حجم رواناب موجب فرآیندهای فرسایش می‌شوند. برای برآورد میانگین سالیانه جزء هیدرولوژی، طول سال به حداقل ۳ دوره براساس شرایط مختلف خاک و محصول تقسیم می‌شود. مثلاً، زمان بعد از شخم، فاز رسیدن محصول و کشت زمستانه یا شرایط پاییزه. سپس با استفاده از درصد شاخص فرساینده‌گی باران برای ماه‌های مربوط به این دوره‌ها، فرسایش خندقی موقت برای هر یک از این دوره‌ها وزن دهی می‌شود تا فرسایش سالیانه برآورد شود. (۲) جزء فرسایشی: ترکیبی از روابط تجربی و معادلات مربوط به فرآیندهای فیزیکی است تا عرض و عمق خندق موقت را پیش بینی کند. از معادلات رگرسیونی برای برآورد عرض اولیه و نهایی خندق موقت استفاده می‌شود. در این معادلات عواملی مانند تخلیه اوج (حاصل از قسمت اول)،

فرسایش خندقی یکی از مهمترین عوامل تلفات خاک و آب و از بین رفتن زمین‌ها است همچنین در بسیاری از مناطق سهم مهمی از رسوب تولیدی حوزه‌های آبخیز، ناشی از این نوع فرسایش است (Poesena et al., 2003). خندق‌های کوچک به خندق‌هایی گفته می‌شود که عمق آن‌ها کمتر از ۸۰ سانتی‌متر است (Valentin et al., 2005). این نوع خندق‌ها به علت گستردگی و تعدد در واحد سطح حوزه‌های آبخیز حساس به فرسایش، تلفات خاک و آب زیادی را ایجاد می‌کند بنابراین پیش بینی ابعاد آن‌ها می‌تواند برآورد مناسبی از شدت فرسایش خندقی ارائه دهد (Chaplot, 2013). بیشترین تلاش‌ها برای مدل‌سازی فرسایش خندقی از طریق پیش‌بینی محل تشکیل خندق‌ها، رشد طولی خندق، حجم رسوب تولیدی در اثر فرسایش خندقی و امکان تشکیل خندق بوده است (Jafarai Gorzin & Kavian, 2009; Tekwa et al., 2015). برای برآورد فرسایش خندقی مدل‌های چندانی وجود ندارد و تنها برای پیش‌بینی ویژگی‌های خندق‌های موقت، مدل EGEM^۱ ارائه شده است (Woodward, 1999) ولی در مورد کارایی این مدل نیز بررسی جامعی در شرایط محیطی مختلف انجام نشده است (Poesena et al., 2003). نوع اصلاح شده این مدل نیز به نام REGEM^۲ ارائه شده است که نسبت به مدل اولیه تکامل یافته و کارایی بیشتری در مورد پیش‌بینی ابعاد خندق‌های موقت دارد (Alonso et al., 2002). در حال حاضر مدل REGEM تنها مدل قابل اتکا برای برآورد فرسایش خندقی به‌ویژه خندق‌های موقت است (Capra et al., 2005). کاپرا و همکاران (Capra et al., 2005) توانایی مدل REGEM در پیش‌بینی سطح مقطع خندق‌های موقت را ضعیف ارزیابی کردند و نشان دادند که همبستگی معنی‌داری بین عرض برآورد شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده وجود ندارد. آن‌ها مشخص نمودند که طول خندق‌ها در تخمین حجم خاک فرسایش یافته توسط این مدل تاثیر زیادی دارد. ناچترگایل و همکاران (Nachtergaele et al., 2001) نیز بیان کردند که همبستگی بسیار خوبی بین مقدار فرسایش خاک از خندق‌های موقت که توسط مدل EGEM پیش‌بینی شده

ضرائب این مدل برای پیش‌بینی ابعاد خندق‌های کوچک اصلاح می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش سه حوزه آبخیز در سه منطقه اُرتاداغ، ملااحمد و سرچم که دارای فرسایش خندقی فعال بوده و بیشتر خندق‌های موجود در آنها دارای اندازه کوچک بودند، انتخاب شدند. منطقه اُرتاداغ در شمال استان اردبیل با میانگین دمای سالانه ۱۵/۱ درجه سلسیوس و بارندگی متوسط سالانه ۲۷۱/۲ میلی‌متر، منطقه ملااحمد در مرکز استان اردبیل با میانگین دمای سالانه ۹ درجه سلسیوس و بارندگی متوسط سالانه ۳۰۳/۹ میلی‌متر و منطقه سرچم در جنوب استان اردبیل با میانگین دمای سالانه ۸ درجه سلسیوس و بارندگی متوسط سالانه ۳۸۴/۶ میلی‌متر می‌باشند. از نظر طبقه بندی اقلیمی به روش دومارتن گسترش یافته، هر سه منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشند. در منطقه اُرتاداغ، حوزه آبخیزی به وسعت ۲۷۲۷ هکتار در محدوده جغرافیایی "۳۹° ۱۸' ۴۲" تا "۳۹° ۱۴' ۰۶" شمالی و "۴۷° ۵۲' ۴۷" تا "۴۷° ۴۱' ۵۶" شرقی، در منطقه ملا احمد، حوزه آبخیزی به وسعت ۵۰۳۸ هکتار در محدوده جغرافیایی "۳۸° ۰۴' ۵۷" تا "۳۸° ۰۷' ۳۷" شمالی و "۴۸° ۱۲' ۱۴" تا "۴۸° ۲۱' ۵۲" شرقی و در منطقه سرچم حوزه آبخیزی به وسعت ۱۱۰۸ هکتار در محدوده جغرافیایی "۳۷° ۰۸' ۱۱" تا "۳۷° ۱۰' ۱۰" شمالی و "۴۷° ۵۹' ۰۶" تا "۴۷° ۵۵' ۵۴" شرقی انتخاب گردید. در شکل ۱ موقعیت حوزه‌های آبخیز انتخاب شده در سطح کشور و استان اردبیل نشان داده شده است.

برآورد ابعاد خندق‌ها با مدل REGEM

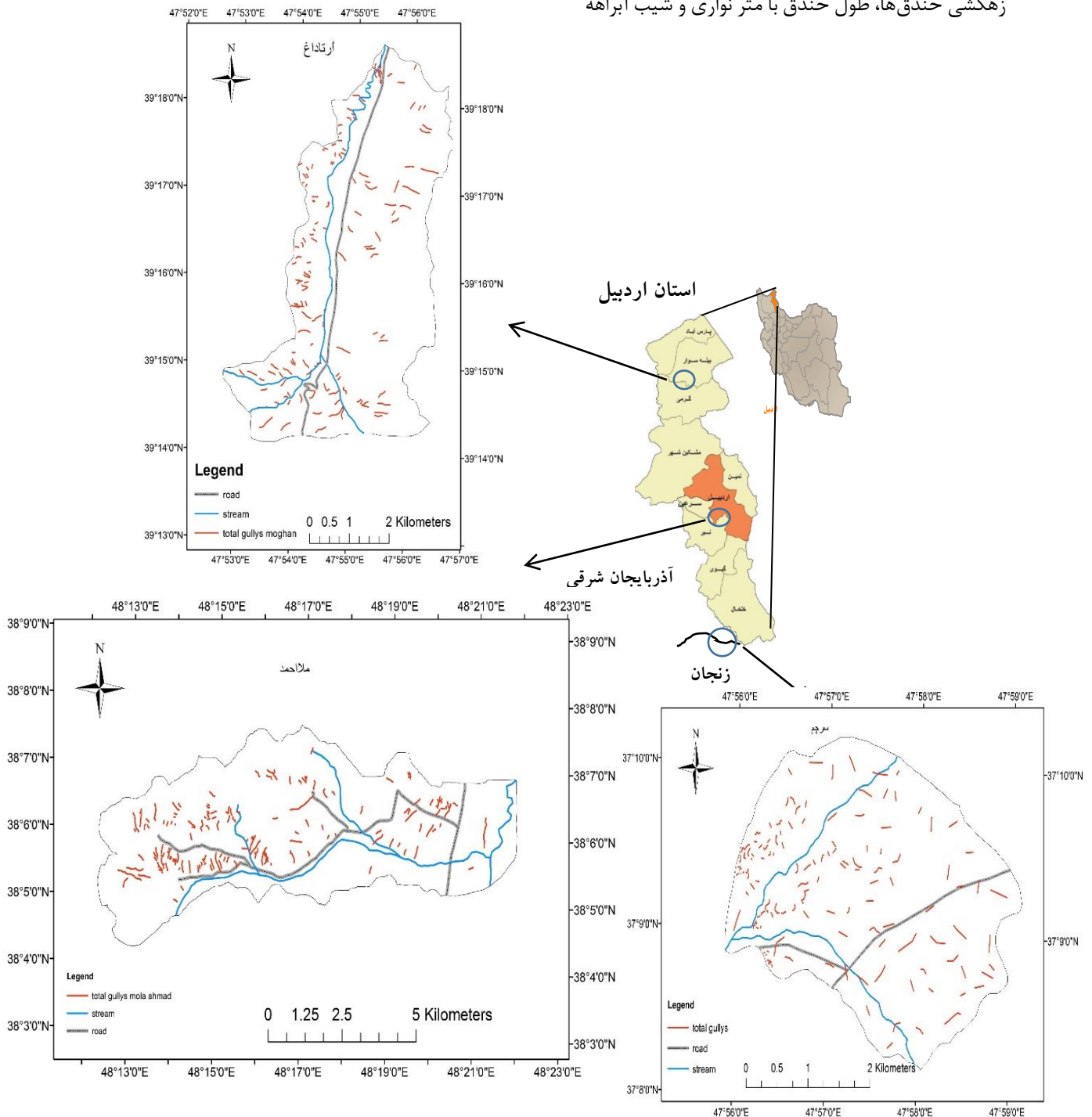
بر اساس بازبدهای میدانی، تعداد ۲۸ خندق در منطقه اُرتاداغ، ۳۳ خندق در منطقه ملا احمد و ۲۰ خندق در منطقه سرچم که دارای بالاکند فعال بودند و عمق آنها در قسمت بالا کند کم‌تر از ۵۰ سانتی‌متر بود، انتخاب شد و مختصات جغرافیایی هر یک با استفاده از GPS ثبت شد (مجموعاً ۸۱ خندق). به منظور تعیین ورودی‌های مدل REGEM، با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، در نرم افزار ArcGIS 10.2 مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۵ متر (پیکسل سایز مساوی ۵ متر) و نقشه شیب

ضریب زبری مانینگ، تنش برشی بحرانی خاک، شیب جریان متمرکز، حداقل و حداکثر عرض مشاهده شده خندق به عنوان متغیرهای مستقل که موثر بر عرض متوسط خندق هستند در نظر گرفته می‌شوند و رابطه رگرسیونی تجربی بین این عوامل و عرض متوسط خندق به عنوان متغیر وابسته برقرار می‌شود (Woodward, 1999; Alonso *et al.*, 2002). در نهایت با ترکیب دو جزء مدل، عرض خندق به عنوان خروجی مدل محاسبه می‌شود و فرض می‌شود که عرض خندق از صفر تا مقدار محاسبه شده تغییر می‌کند. برای محاسبه میانگین عرض خندق ضریب تصحیح $W=0/664$ (بدون واحد) در مقدار محاسبه شده ضرب می‌شود. در نهایت با ثابت در نظر گرفتن عمق خندق در تمام طول آن و با داشتن عرض متوسط، عمق و طول خندق حجم خاک فرسایش یافته محاسبه می‌شود. با استفاده از حجم خاک از دست رفته و جرم مخصوص ظاهری خاک، وزن خاک فرسایش یافته بر حسب تن برآورد می‌شود. با توجه به اهمیت خندق‌های کوچک در فرسایش خاک و تولید رسوب و نیاز به پیش‌بینی ابعاد آن، در این پژوهش سعی می‌شود از مدل REGEM برای تعیین ویژگی‌های خندق‌های کوچک استفاده گردد.

در استان اردبیل فرسایش خندقی در سه حوزه آبخیز اُرتاداغ در شمال استان، ملااحمد در مرکز استان و منطقه سرچم در جنوب استان به طور گسترده وجود دارد. در این پژوهش به منظور پیش‌بینی شدت فرسایش خندقی در این سه حوزه، ابعاد خندق‌های کوچک با استفاده از مدل REGEM در دو مقطع زمانی با فاصله ۱ سال برآورد می‌گردد و با اندازه‌گیری‌های مستقیم آن مقایسه می‌شود. به این ترتیب مدل REGEM برای تعیین حجم خاک فرسایش یافته از خندق‌های کوچک در طول یک سال که با اندازه‌گیری مستقیم تغییرات ابعاد خندق به دست آمده اصلاح و به کار برده می‌شود. هرچند مدل REGEM برای تعیین فرسایش خندق‌های موقت ایجاد شده است، با توجه به اینکه خندق‌های کوچک نیز ابعاد نزدیک به خندق‌های موقت دارند و ابعاد خندق از اجزاء اصلی پیش‌بینی مدل REGEM است، در این پژوهش فرض شده است می‌توان از مدل REGEM در پیش‌بینی خندق‌های کوچک نیز استفاده کرد، به همین منظور

زهکشی از نسبت اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای خندق به طول آن تعیین شد.

برای محدوده‌های مورد بررسی تهیه شد. سپس با استفاده از نرم افزار Global mapper 14 مساحت و شیب حوزه زهکشی خندق‌ها، طول خندق با متر نواری و شیب آبراه



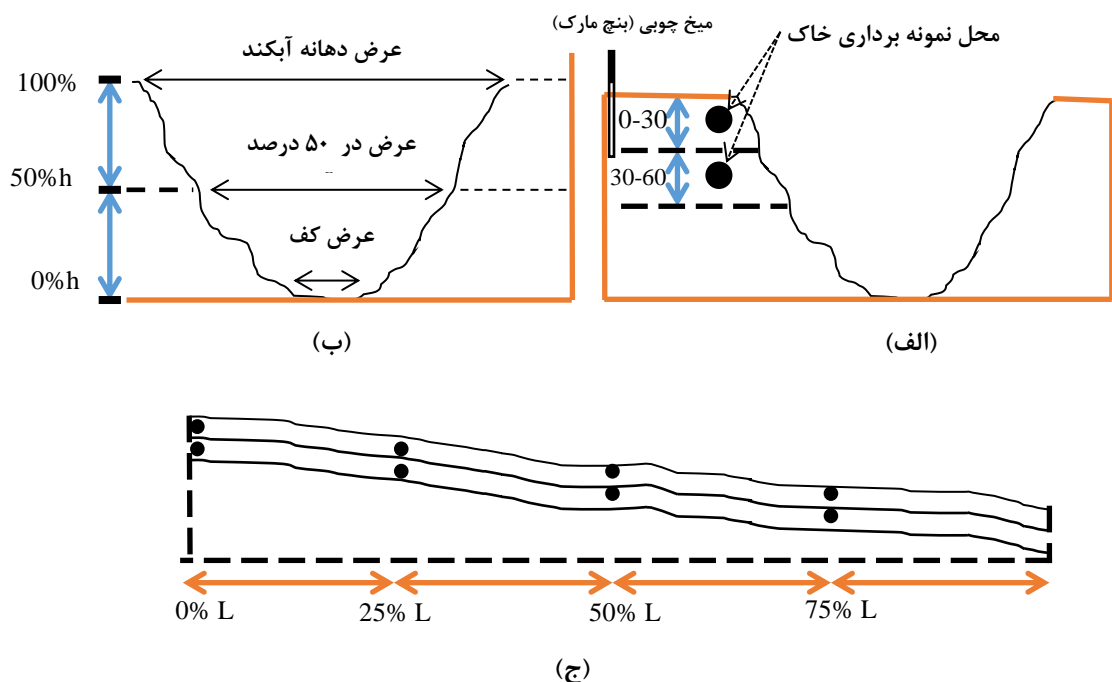
Watershed	Eastern longitude	North latitude
Ortadag	47° 56' 41" to 47° 52' 47"	39° 14' 06" to 39° 18' 42"
Molla ahmad	48° 21' 52" to 48° 12' 14"	38° 07' 37" to 38° 04' 57"
Sarcham	47° 55' 54" to 47° 59' 06"	37° 10' 10" to 37° 08' 11"

شکل ۱- موقعیت حوزه‌های آبخیز مطالعه شده در سطح کشور و استان اردبیل و آبکندهای انتخاب شده در سطح حوزه‌ها
Figure 1. Location of study watersheds in Iran and Ardabil province and selected gullies in watersheds

شاخص نصب و مشخصات هندسی خندق‌ها شامل عمق، عرض دهانه، عرض در ۵۰ درصد عمق و عرض کف در مقطع عرضی این نقاط تعیین شد و از هر نقطه، نمونه برداری خاک انجام گردید. شاخص‌های نصب شده به منظور تعیین دقیق محل مقطع‌های انتخاب شده در طول زمان پایش مقطع استفاده گردید. سپس تغییرات ابعاد هندسی این خندق‌ها شامل پیشروی سر خندق و تغییر عمق، عرض دهانه، عرض در ۵۰ درصد عمق و عرض کف با توجه به شاخص‌های نصب شده در محل، در طول یک سال اندازه‌گیری شد (شکل ۲).

همچنین بر اساس اطلاعات هواشناسی هر حوزه، بارش ۲۴ ساعته و بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال و تیپ بارش غالب حوزه‌ها تعیین گردید. برای این منظور از اطلاعات تعداد روزهای دارای بارش باران و برف، عمق بارندگی، شدت و مدت بارش و تعداد روزهای دارای یخبندان در سال مورد مطالعه استفاده شد (Shahab *et al.*, 2016)

طول هر خندق با متر نواری اندازه‌گیری و در چهار نقطه از طول هر خندق شامل سر خندق و فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد طول از سر خندق میخ‌های چوبی به عنوان



شکل ۲- الف) نمونه برداری خاک و ب) اندازه‌گیری عرض و عمق مقطع خندق و ج) نقاط اندازه‌گیری و نمونه‌برداری در طول خندق

Figure 2. Schematic shape of a) soil sampling and b) measurement of depth and width at each gully section; c) measurement and sampling points along the gully

(Moghaddas, 2011). با استفاده از نمونه‌های خاک برداشته شده، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه دست نخورده، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر، بافت خاک به روش قرائت ۴ زمانه و کربن آلی به روش والکلی-بلک (Page *et al.*, 1982)، شاخص فرسایش پذیری خاک (Wischmeier & Smith, 1978) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Kemper & Rosenau, 1986) تعیین شد. همچنین به روش تک استوانه و با مدل فیلیپ، سرعت نهایی نفوذ آب و گروه

درصد پوشش گیاهی، سنگریزه و خاک لخت در حوزه زه‌کشی هر آبکند با قرار دادن ۱۰ پلات یک مترمربعی تصادفی در امتداد یک یا دو ترانسکت اندازه‌گیری شد و نمونه‌برداری خاک نیز انجام شد. مقاومت برشی نزدیک اشباع خاک در هر نقطه از طول (سرخندق و فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد فاصله از سرخندق) و ۱۰ نقطه از حوزه زه‌کشی خندق‌ها نیز با اشباع دستی خاک از سطح، با استفاده از ابزار پره برشی (مدل گیلسون TO175) به صورت میدانی و با پنج تکرار تعیین گردید (Hafezi

هیدرولوژی مدل محاسبه شد (Nachtergaele *et al.*, 2002). در ادامه بر اساس روابط رگرسیونی موجود بین ابعاد خندق و ویژگی های خاک، عوامل جز فرسایشی مدل شامل تنش برشی و عامل فرسایش خاک در هر گام زمانی با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه گردید (Nachtergaele *et al.*, 2001).

$$\tau_c = 0.311 \times 10^{(0.01825S)} \quad (۴)$$

$$k_d = 0.1\tau_c^{-0.5} \quad (۵)$$

در این روابط τ_c عامل تنش برشی بحرانی مدل است که شاخصی از نیروی تنش برشی وارده به خاک در زمان ایجاد خندق است، SS مقاومت برشی نزدیک اشباع با واحد $Kgcm^{-2}$ و k_d عامل فرسایش خاک در مدل با واحد $cm^3 N^{-1} sec^{-1}$ است.

در نهایت با ترکیب دو جز مدل و با استفاده از روابط ۶ تا ۸ ابعاد خندقها برآورد شد (Tekwa *et al.*, 2015):

$$D_e = \frac{Kk_d \cdot \rho_s}{\rho \cdot d_s} \quad (۶)$$

$$W = 2.51Q^{0.412} \quad (۷)$$

$$L_{max} = 80.3A_d^{0.6} \quad (۸)$$

در این روابط D_e میانگین عمق خندق بر حسب cm، ρ جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب $grcm^{-3}$ ، d_s قطر میانگین ذرات خاک (شن، سیلت و رس) با واحد mm است که با میانگین گیری وزنی از نسبت و قطر متوسط ذرات حاصل از آزمایش بافت خاک محاسبه شد. عامل K فرسایش پذیری معادله جهانی فرسایش خاک از نمودار ویشمایر و اسمیت به دست آمد، W عرض متوسط خندق (متر)، Q دبی میانگین رواناب ورودی به خندق (m^3/s) (جز هیدرولوژیکی مدل)، L_{max} حداکثر طول خندق (متر) و A_d مساحت حوزه زه کشی خندق (هکتار) هستند.

حداکثر طول (L_{max}) و میانگین عرض خندقها (W) به عنوان خروجی مدل REGEM، با استفاده از مجموعه ویژگی های تعیین شده به دست آمد و با در نظر گرفتن میانگین عمق هر خندق، حجم خندقها برآورد شد. برآورد حداکثر طول، میانگین عرض و حجم خندقها با مدل REGEM در دو مقطع زمانی با فاصله یک سال انجام گردید و اختلاف حجم خندق در این فاصله زمانی به

هیدرولوژیکی خاک در سه نقطه از حوزه خندقها تعیین شد (Reynolds *et al.*, 2002). با استفاده از میانگین درصد پوشش سطح و گروه هیدرولوژیکی خاک حوزه زه-کشی خندقها، شماره منحنی (CN) حوزه هر خندق که بیانگر شدت تولید رواناب در حوزه است، برای هر فصل سال تعیین شد (Rafahi, 2006). همچنین با بازدید صحرایی و استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ (۲۰۱۳) نوع پوشش گیاهی و کاربری حوزه زه کشی و کانال هر خندق تعیین گردید و با استفاده از آن ضریب زبری مانینگ حوزهها تعیین شد (Rafahi, 2006). به این ترتیب تمام عوامل ورودی مدل REGEM، برای برآورد ابعاد خندقها به دست آمد.

با داشتن نسبت تولید رواناب حوزه هر خندق بر اساس CN، مقدار بارش در هر واقعه بارشی و مساحت حوزه زه کشی هر خندق، دبی پیک و حجم رواناب ورودی به سر خندقها در هر واقعه بارش محاسبه شد (Alonso *et al.*, 2002). برای این منظور عمق بارش در نسبت تولید رواناب ضرب می شود تا عمق رواناب به دست آید، سپس عمق رواناب (برحسب میلیمتر) در مساحت حوزه زه کشی خندق (بر حسب هکتار) ضرب و مقدار حاصل در ۱۰ ضرب می شود تا حجم رواناب ورودی به سر آبکند (برحسب متر مکعب) به دست آید. با داشتن حجم رواناب ورودی به آبکند در هر واقعه بارش حداکثر دبی وارد شده به آبکند و کل رواناب وارد شده در هر فصل سال به دست آمد و با استفاده از روابط ۱ تا ۳ جز هیدرولوژیکی مدل در هر فصل محاسبه شد.

$$t_b = \frac{2V_b}{Q_p} \quad (۱)$$

$$V_b = \int_{t=0}^{t=t_b} Q dt \quad (۲)$$

$$Q = \left(\frac{t}{t_p}\right) Q_p \quad (۳)$$

در این روابط t_b زمان پایه هیدروگراف واحد خندق، V_b حجم کل رواناب ورودی به خندق (m^3)، Q_p دبی حداکثر ورودی به خندق و Q دبی در لحظه t و t_p دبی میانگین رواناب ورودی می باشد (m^3/s). این عوامل براساس اطلاعات بارش حوزه های آبخیز و CN خندقها برای هر بارش محاسبه گردید و با به دست آمدن عامل Q ، جز

برای سه منطقه اصلاح شد تا با استفاده از آن بتوان بهترین برآورد از حجم خاک فرسایش یافته را به دست آورد. کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار SPSS16 انجام شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱، میانگین و دامنه تغییرات ابعاد هندسی و ویژگی‌های حوزه زهکشی خندق‌های انتخاب شده، برای سه منطقه مورد مطالعه بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرائی ارائه شده است. در جدول ۱ مشاهده می‌شود خندق‌های منطقه ارتاداغ دارای طول بیشتری بوده در حالی که منطقه سرچم کوتاهترین خندق‌ها را دارا می‌باشد و منطقه ملا احمد در حد وسط می‌باشد. حجم خندق‌های سه منطقه نیز روند مشابه دارد ولی از نظر عمق و عرض خندق هر سه منطقه شبیه به هم هستند. طول آبراهه زهکشی و مساحت حوزه زهکشی خندق‌های منطقه سرچم نسبت به دو منطقه دیگر بیشتر می‌باشد.

عنوان برآورد حجم خاک فرسایش یافته در طول یک سال محاسبه گردید. با اندازه‌گیری مستقیم ابعاد خندق در این دو فاصله زمانی نیز حجم واقعی خندق‌ها و تغییرات آن در طول یک سال به دست آمد. برای این منظور، میانگین سطح مقطع خندق در ۴ نقطه (سر خندق و فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از سر خندق) در طول اندازه‌گیری شده خندق ضرب و حجم خندق در دو مقطع زمانی به دست آمد. بنابراین یک مقدار اندازه‌گیری شده و یک مقدار برآورد شده از روی مدل برای تغییرات حجم هر خندق در طول مدت مورد نظر به دست آمد. در ادامه به منظور تعیین کارایی مدل REGEM در برآورد حجم خندق و میزان خاک فرسایش یافته در اثر توسعه خندق-ها، همبستگی بین برآورد ابعاد خندق با مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در سه منطقه مورد مطالعه انجام شد. همچنین همبستگی بین برآورد تغییر حجم خندق‌ها با مقادیر واقعی تغییر حجم در طول یک سال بررسی شد. در نهایت مجدداً با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون گام به گام بین عوامل مدل و ابعاد واقعی خندق‌ها، ضرائب مدل

جدول ۱- میانگین و دامنه تغییرات ابعاد هندسی خندق‌ها و ویژگی‌های حوزه زهکشی آن‌ها

Table 1. Mean and range of geometric dimensions of gullies and their drainage basin characteristic

	Ordadagh		Mulla Ahmad		Sarcham	
	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range
Length (m)	35	21-53	31	17-45	18	12-26
Mean wide (m)	1.2	0.3-2.1	0.9	0.4-2	1	0.5-1.5
Depth (m)	0.45	0.35-0.5	0.4	0.35-0.5	0.43	0.35-0.5
Cross section area (m ²)	0.6	0.4-1.2	0.5	0.4-1	0.4	0.3-0.9
Volume (m ³)	20	11-32	17	10-26	11	9-21
Drainage basin area (ha)	16	8-28	15	7-25	26	11-31
Waterway length (Km)	0.6	0.4-1	0.8	0.5-1.1	1.3	0.7-2.2
Waterway slope (%)	9	2-11	7	3-13	5	1-10
Drainage basin slope (%)	12	5-23	8	1-29	11	5-14
Curve Number (CN)	70	60-78	65	61-74	75	71-81
Shear strength (kg.cm ⁻²)	0.7	0.2-1.2	0.7	0.1-1.5	0.6	0.2-1.7

خندق‌ها در طول یک سال جزئی بود لذا از آوردن مقادیر آن‌ها در جدول ۲ صرف نظر شد. همچنین در جدول شماره ۳ همبستگی بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده تغییرات خندق‌ها در یک سال، برای ۳ منطقه ارائه شده است.

میانگین تغییرات ابعاد هندسی و حجم خندق‌های سه منطقه در طول یک سال مطالعه بیانگر شدت فرسایش خاک در این مدت می‌باشد (جدول ۲). در جدول ۲ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده شدت فرسایش توسط مدل REGEM ارائه شده است. لازم به ذکر است تغییرات عمق

جدول ۲- میانگین تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده طول، عرض و حجم خندق‌ها در طول یک سال در مناطق مورد مطالعه

Table 2. Average of measured and estimated length, width and volume variations of gullies over one year in studied areas

	Ordadagh		Mulla Ahmad		Sarcham	
	Measured	Estimated by REGEM	Measured	Estimated by REGEM	Measured	Estimated by REGEM
Length change (m)	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.34
Average wide change (m)	0.1	0.15	0.15	0.13	0.2	0.18
Volume change (m ³)	2.5	2.2	1.5	1.6	1.8	1.7

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل REGEM تغییرات خندق‌ها در یک سال
Table 3. Pearson Correlation Coefficient (r) Between Measured and Estimated by REGEM Model Values of gullies Change in a Year

	Length	Average wide	Volume	Volume change in one year
Ordadagh	0.43 ^{ns}	0.54*	0.41 ^{ns}	0.53*
Mulla Ahmad	0.38 ^{ns}	0.41 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.49**
Sarcham	0.60**	0.58**	0.64**	0.66**

کارایی لازم در برآورد تغییر ابعاد خندق و شدت فرسایش در طول یک سال را نداشت. زارعی و همکاران (Zarei et al., 2018) نیز با کاربرد مدل REGEM در استان گلستان نتیجه گرفتند که این مدل توانایی لازم را در برآورد فرسایش خندقی ندارد. هر چند طبق جدول ۲ تفاوت مقادیر عرض متوسط و طول اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل برای منطقه ملا احمد و ارتاداغ کم به نظر می‌رسد، ولی از آنجائیکه خندق‌های مورد بررسی خندق کوچک می‌باشند این مقدار تفاوت نیز قابل توجه است و همین مساله باعث شده تا همبستگی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده معنی دار نشود.

برای منطقه سرچم برآورد تغییر عرض و حجم کمتر و تغییر طول بیشتر از مقدار مشاهده‌ای است (جدول ۲). در این منطقه همبستگی معنی‌داری بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده تغییرات مورد نظر خندق‌ها مشاهده شد. این مساله نشان می‌دهد در منطقه سرچم، مدل REGEM توانایی لازم برای پیش بینی تغییر ابعاد و حجم خندق‌های کوچک در طول یک سال را دارا می‌باشد. این یافته مطابق با پژوهش ناچترگیل و همکاران (Nachtergaele et al., 2001) است، که کارایی این مدل را در تعیین هدر رفت خاک در اثر خندق‌های موقت خوب ارزیابی کرده است. رضایی مقدم و بهبودی (Rezaei

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود در منطقه ارتاداغ مقادیر برآورد شده تغییر طول و حجم در طول یک سال کمتر از مقادیر مشاهده شده است ولی تغییر عرض برآورد شده بیشتر است. در این منطقه همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد مدل REGEM تنها در مورد عرض و تغییر حجم خندق‌ها معنی‌دار است. کمپانی و همکاران (Kompani et al., 2011) نیز نشان دادند که در مدل REGEM عرض خندق بیشترین تاثیر را در برآورد حجم آن دارد و مهمترین بعد هندسی در برآورد حجم خندق و مقدار خاک فرسایش یافته می‌باشد. در پژوهش‌های دیگر نیز بیان شده است که عرض خندق بیشترین تاثیر را در تعیین حجم خندق دارد (Soleimanpour et al., 2009). در منطقه ملا احمد تغییر طول و عرض برآورد شده خندق کمتر از مقادیر مشاهده‌ای است ولی تغییر حجم نزدیک به مقدار واقعی برآورد شده است. هرچند در این منطقه نیز همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و برآورد مدل REGEM برای تغییر حجم خندق‌ها معنی‌دار بود، ولی مقدار این همبستگی نسبت به ارتاداغ کمتر است. بنابراین کارایی مدل REGEM در برآورد مقدار فرسایش خندقی، برای دو منطقه ارتاداغ و ملا احمد مشابه می‌باشد. می‌توان گفت با توجه به همبستگی‌های کم بین مقادیر مشاهده شده و برآوردی مدل، مدل REGEM در این دو منطقه

مدل‌های با بیشترین R^2 و کمترین RMSE انتخاب شدند که بهترین برآوردگر را ارائه می‌دهند (Nayebi, 2014). برای اصلاح رابطه تنش برشی بحرانی مدل، بین تنش برشی (τ_c) مدل EGEM و نیروی جریان حداکثر دبی ورودی به خندق‌ها با ویژگی‌های فیزیک خاک خندق‌ها رگرسیون گام به گام برقرار شد و بهترین مدل که دارای بیشترین R^2 و کمترین RMSE بود انتخاب شد. برای عامل فرسایش خاک مدل نیز از رگرسیون گام به گام بین عامل فرسایش مدل (k_d) و عامل τ_c و نیروی جریان دبی پیک استفاده شد (Alonso *et al.*, 2002).

در جدول شماره ۴ اجزاء روابط، همانند روابط ۴ تا ۸ می‌باشند. لازم به توضیح است که روابط مورد استفاده در جز هیدرولوژیکی مدل REGEM (روابط ۱ تا ۳) دارای پایه فیزیکی بوده و از داده‌های هیدروگراف واحد و CN حوزه‌ها استفاده می‌کند، لذا نیازی به اصلاح برای منطقه وجود نداشت، اما روابط جز فرسایش و برآورد ابعاد خندق در مدل، مدل‌های رگرسیونی بوده و با برقراری رابطه بین ویژگی‌های خاک و حوزه زه‌کشی با ابعاد خندق به دست آمده لذا این روابط برای منطقه اصلاح و بهینه شده است (Alonso *et al.*, 2002).

(Moghaddam & Behbodi, 2011) نیز در مطالعه خود، برآورد مدل EGEM را نزدیک به واقعیت بیان کردند. مشاهده می‌شود تفاوت نسبتاً زیادی بین برآورد انجام شده با مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد (جدول ۲) بنابراین هرچند همبستگی‌های مشاهده شده برای مدل (جدول ۳) نسبتاً زیاد به نظر می‌رسد اما برای برآورد دقیق ابعاد خندق‌ها کافی نمی‌باشد. مشاهده می‌شود مدل REGEM به شکل موجود، توانایی لازم برای برآورد تغییر ابعاد خندق‌های کوچک را ندارد و تنها در یکی از سه منطقه مورد مطالعه نتایج قابل قبولی داشت. بنابراین با برقراری رگرسیون بین مقادیر واقعی مشاهده شده و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک و حوزه زه‌کشی خندق‌ها (Nachtergaele *et al.*, 2002)، روابط شماره ۴ تا ۸ برای برآورد ویژگی‌های خندق‌ها در مناطق مورد مطالعه اصلاح شده متناسب با شرایط منطقه ارائه شد. روابط اصلاح شده به همراه ضریب تبیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) مدل‌های رگرسیونی آن‌ها در جدول شماره ۴ ارائه شده است. در ایجاد مدل رگرسیونی بین ویژگی‌های خاک و حوزه زه‌کشی خندق‌ها با ابعاد هندسی آن‌ها،

جدول ۴- روابط اصلاح شده مدل REGEM برای مناطق مورد مطالعه

Table 4. Modified relationship of REGEM model for study Areas

Model Estimation factors	Modified equation	R^2	RMSE
Shear stress factor	$\tau_c = 0.259 \times 10^{(0.0225S)}$	0.93	0.01
Soil erosion factor	$k_d = 0.1\tau_c^{-0.5} + 0.2$	0.90	0.03
Average depth	$D_e = \frac{Kk_d \cdot 0.9\rho_s}{\rho \cdot d_s}$	0.96	0.04
Average wide	$W = 1.89Q^{0.6}$	0.98	0.1
Maximum length	$L_{max} = 64.5A_d^{0.8}$	0.96	0.4

مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل REGEM تصحیح شده و برای عرض متوسط، طول، عمق و حجم خندق‌ها ارائه گردید. همچنین همبستگی بین برآورد و مقدار واقعی تغییر حجم خندق‌ها که نشان دهنده مقدار هدر رفت خاک در طول یک سال است ارائه شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود با تصحیح روابط مدل REGEM، همبستگی بین برآورد ها و مقادیر مشاهده شده تغییرات ابعاد خندق‌ها در هر سه منطقه معنی‌دار شده و برآوردها به مقدار واقعی نزدیک شد. با استفاده از مدل اصلاح شده متوسط تغییر حجم خندق‌ها

پس از به دست آوردن روابط تصحیح شده مدل REGEM برای منطقه (جدول شماره ۴)، بار دیگر عرض متوسط و طول خندق‌های مورد نظر برآورد شد و با داشتن این عوامل حجم خندق‌ها نیز برآورد گردید. این برآوردها برای دو مقطع زمانی مورد نظر با فاصله ۱ سال انجام و اختلاف بین آن‌ها به عنوان توسعه فرسایش خندقی در نظر گرفته شد. مجدداً با بررسی همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده با مدل REGEM تصحیح شده برای منطقه، کارایی این روابط برای برآورد تغییر ابعاد خندق‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول شماره ۵ همبستگی بین

انطباق دارد. با استفاده از این روابط، فقط همبستگی برآورد عرض متوسط در منطقه ملاحمد با مقادیر واقعی معنی دار نشد. بنابراین مشاهده می شود تصحیح مدل REGEM، کارایی این مدل را برای پیش بینی ابعاد خندق ها و تغییرات آن در طول یک سال در منطقه مورد نظر، تا حد زیادی افزایش داد.

در طول یک سال برای منطقه آرتاداغ ۲/۴۵، برای ملا احمد ۱/۵ و برای سرچم ۱/۸۳ مترمکعب برآورد شد که با مقادیر اندازه گیری شده (جدول ۲) نزدیک است. همچنین با استفاده از روابط اصلاح شده تغییر طول خندق ها در طول یک سال برای سه منطقه آرتاداغ، برای ملا احمد و سرچم به ترتیب ۰/۴، ۰/۴ و ۰/۳۳ متر تعیین شد که با مقادیر اندازه گیری شده (جدول ۲)

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده با مدل REGEM تصحیح شده

Table 5. Pearson Correlation Coefficient (r) Between Measured and Estimated by modified REGEM Model values

	Length	Average wide	Average depth	Volume	Volume change in one year
Ordadagh	0.68**	0.71**	0.69**	0.65**	0.76**
Mulla Ahmad	0.56**	0.42 ^{ns}	0.65**	0.61**	0.67**
Sarcham	0.65**	0.69**	0.59**	0.70**	0.78**

با توجه به اینکه از عوامل محیطی و ویژگی های مختلف خندق استفاده می کند می توان از آن در مورد خندق های دائمی کوچک نیز استفاده کرد. در این پژوهش از مدل REGEM علاوه بر پیش بینی ابعاد خندق های کوچک، برای تعیین تغییرات آن ها در طول یک سال نیز استفاده شد و مشاهده شد که برای کاربرد بهتر این مدل جهت پیش بینی ابعاد و تغییرات خندق های کوچک، نیاز به تصحیح مدل و تغییر ضرائب آن با توجه به ویژگی های منطقه می باشد. در این پژوهش ضرائب روابط مربوط به پیش بینی ابعاد خندق ها با مدل REGEM برای سه منطقه از استان اردبیل اصلاح شد، و می توان با روابط اصلاح شده به برآوردهای دقیقتری از فرسایش آبکندی منطقه دست یافت. بنابراین در پژوهش های بعدی نیاز است از این مدل در حوزه های آبخیز مختلف و شرایط متفاوت محیطی استفاده شود و تصحیحات لازم در روابط مدل انجام گیرد تا بتوان با اطمینان بیشتری در مورد خندق های کوچک از آن استفاده نمود.

مطالعات محدودی در مورد اصلاح مدل های مربوط به فرسایش خندقی موجود است. تکوا و همکاران (Tekwa et al., 2015) نشان دادند که استفاده از روابط اصلاح شده مدل EGEM، برآورد فرسایش را به مقدار واقعی نزدیکتر می کند. استفاده از مدل تصحیح شده براساس ویژگی های منطقه مورد نظر، اثر عوامل محلی را در برآورد دخالت داده و منجر به افزایش کارایی آن می شود (Tekwa et al., 2015). هر چند تصحیح مدل کاربرد آنرا را دقیقتر می کند ولی سهولت استفاده از مدل را نیز کاهش می دهد و نیاز به عملیات انطباق مدل با داده های حاصل از اندازه گیری مستقیم را به وجود می آورد (Capra et al., 2005). با این وجود می توان گفت برای کاربرد مدل ها، به ویژه مدل REGEM که کمتر مورد استفاده قرار گرفته، بهینه سازی مدل با شرایط منطقه ضروری می باشد.

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان می دهد هر چند مدل REGEM برای تعیین ویژگی های خندق های موقت ارائه شده، ولی

References

- Alonso C.V., Bennett S., and Stein O.R. 2002. Predicting head cut erosion and migration in concentrated flows. *Water Resources Research*, 38(12):39-1.
- Capra A., Mazzara L. M., Scoicolone B. 2005. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, (Italy). *Catena*, 59: 133-146.
- Chaplot V. 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology*, 186:1-11.
- Hafezi Moghaddas N. 2011. Engineering Geology. Arses press. 488p. (In Persian)
- Jafarai Gorzin B., and Kavian A. 2009. Assessment of Gully Erosion Occurrence in Sorkh-Abad Watershed Using Remote Sensing and Geographical Information System. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*. 3(7): 55-58. (In Persian)
- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI. Pp 425–442.
- Kompani-Zare M., Soufi M., Hamzehzarghani H., and Dehghani M. 2011. The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran. *Catena*, 86:150–159.
- Nachtergaele J., and Poesen J. 2002. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. *European Journal of Soil Science*, 53:449– 463.
- Nachtergaele J., Poesen J., Steegen A., Takken I., Beuselinck L., Vandekerckhove L., and Govers G. 2001. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. *Geomorphology*, 40:237–252.
- Nayebi H. 2014. Applied Advanced Statistics by SPSS. University of Tehran press. 401p. (in Persian)
- Page A. L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis, part2, chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America. Madison, WI. 510p.
- Poesena J., Nachtergaelea J., Verstraetena G., and Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50:91– 133
- Rafahi H.Gh. 2006. Water erosion and conservation. University of Tehran press. 671p. (In Persian)
- Reynolds W.D., Elrick D.E., and Youngs E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In: Dane J.H. and G.C. Topp (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA. pp. 818- 826.
- Rezaei Moghaddam M.H., and Behbodi A. 2011. Application of EGEM in Estimating the Erosion of Ephemeral Gullies in Sarand Chay Drainage Basin. *Geographic Space*. 35: 135-153. (In Persian)
- Shahab H., Emami H., haghnia G.H., Esmali A., and Mahmood Abadi M. 2016. Effect of topography and determination of the most important soil properties on gully erosion development in Ardebil area. Ferdowsi University of Mashshd PhD thesis. 197p (In Persian)
- Soleimanpour S.M., Soufi M., Ahmadi H. 2009. Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province. *Water and Soil*, 23:131-141. (In Persian)
- Tekwa I.J., Laflen J.M., MusaKundiri A. 2015. Efficiency test of adapted EGEM model in predicting ephemeral gully erosion around Mubi, Northeast Nigeria. *International Soil and Water Conservation Research*, 3: 15-27.
- Valentin C. J., Poesen J., Yong Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63:132–153.
- Wischmeier W.H., and Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook, Washington, D.C, 537p
- Woodward D.E. 1999. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Catena*, 37:393-399.
- Zarei H., Najafinejad A., Hosseinalizadeh M., and Alipour K. 2018. Efficiency assessment of the EGEM to estimate gully erosion in Iky-Aghzly watershed of Golestan province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5): 147-162. (In Persian)

Estimating of Gully Erosion Based on REGEM Model Equations and Modification of It's for Ardebil Province

Hossein Shahab Arkhazloo^{1*}, Shokrallah Asghari²

(Received: September 2018 Accepted: April 2019)

Abstract

Small gully due to high density per unit area is one of the most important causes of soil and water losses in watersheds that have gully erosion. In this research, with the selection of 81 small gullies in three watersheds from Ordadagh, Mulla Ahmad and Sarcham in Ardebil province, the size of gullies was determined with a one-year interval and the change in length, average width, depth and volume of them were recorded. Also, gullies size was estimated using the REGEM model with a one-year interval and the correlation between observed and estimated values was investigated. In order to modify and optimize the model for the studied areas, the model was corrected using regression models and again evaluated for estimating the gullies size and its variations over one year. To correct the model, the regressive shear stress parameters and soil erosion parameters of the REGEM model were used to estimate the dimensions of the gully including length, average width and moderate depth. The results show that the REGEM model only in Sarcham area had the useful efficiency in estimating gully erosion and its estimation correlation coefficient with measured gullies volume changes was 0.66. While estimating the size of the gullies with the modified model, in all three regions, showed a significant correlation with the measured values. The correlation between the measured and estimated values by modified model for gullies volume change was determined to be 0.76, 0.67, and 0.78, for Ordadagh, Mulla Ahmad and Sarcham respectively. Therefore, in order to apply the model in other regions, it is necessary to correct the model according the conditions of the region.

Keywords: Estimation of erosion, Modification of REGEM model, Small gullies

Shahab Arkhazloo H., Asghari Sh. 2020. Estimating of gully erosion based on REGEM model equations and modification of it's for Ardebil Province. *Applied soil Research*. 8(1): 162-173.

1. Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

2. Associated Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

*Corresponding Author Email: h.shahab@uma.ac.ir